

La détermination pratique des intervalles de confiance des
comptages de cailloux et des mesures d'émoussé. Comparaison
des mesures d'émoussé de Cailleux et de Krumbein/*Determination
of confidence limits characterizing gravel pétrographie counts and
roundness values. Comparison of roundness values by the Cailleux
and the Krumbein methods*

Albert Pissart, Frédérique Duchesne, Monsieur Christian Vanbrabant

Citer ce document / Cite this document :

Pissart Albert, Duchesne Frédérique, Vanbrabant Christian. La détermination pratique des intervalles de confiance des comptages de cailloux et des mesures d'émoussé. Comparaison des mesures d'émoussé de Cailleux et de Krumbein/*Determination of confidence limits characterizing gravel pétrographie counts and roundness values. Comparison of roundness values by the Cailleux and the Krumbein methods*. In: Géomorphologie : relief, processus, environnement, Septembre 1998, vol. 4, n°3. pp. 195-214;

doi : <https://doi.org/10.3406/morfo.1998.955>

https://www.persee.fr/doc/morfo_1266-5304_1998_num_4_3_955

Fichier pdf généré le 30/04/2018

Résumé

Résumé Pour interpréter correctement les résultats de comptages de cailloux de différentes natures, il convient d'en calculer la signification statistique. Celle-ci permet de connaître, en fonction du nombre de cailloux considérés, l'intervalle dans lequel se trouve, avec une probabilité définie (par exemple 95 %), la valeur réelle. Il est aisé de déterminer le nombre de cailloux à considérer pour obtenir une précision donnée. De la même manière, la détermination de l'intervalle de confiance que l'on peut accorder à des séries de mesures d'émoussé évite de considérer des différences non significatives. Le mode de calcul de cet intervalle peut être appliqué aux mesures de l'indice d'émoussé de Cailleux comme aux mesures de l'indice d'arrondi de Krumbein. Ces deux méthodes d'étude de l'émoussé donnent des moyennes comparables bien que la mesure d'un seul caillou puisse être très différente. La mesure de l'émoussé selon Krumbein présente cependant deux avantages : elle est beaucoup plus rapide que la mesure selon Cailleux et des expérimentateurs différents trouvent, lorsqu'ils traitent le même lot de cailloux par la méthode de Krumbein, des résultats qui sont plus proches les uns des autres. La méthode de Cailleux présente par contre l'avantage de permettre la réalisation d'histogrammes plus détaillés et peut être utilisée pour des mesures automatiques par analyseur d'images qui seraient malaisées avec la méthode de Krumbein. Le nombre d'éléments à mesurer pour obtenir une précision donnée est facile à calculer pour les deux méthodes.

Abstract

Abstract The results of gravel pétrographie counts may be better assessed if their statistical parameters are known. If the number of pebbles counted is known, it is easy to determine the mean value with a defined probability (e.g. 95 %). In the same way, the determination of confidence limits characterizing roundness values avoids any misinterpretation of the results. This determination can be applied to values obtained by both the Cailleux and Krumbein methods. Both give similar means, although population distributions may be very different. The Krumbein method is much quicker but the Cailleux method lends itself to automated image analysis and is more appropriate for producing histograms. The number of pebbles necessary in order to obtain a defined accuracy is easy to determine for both methods.

La détermination pratique des intervalles de confiance des comptages de cailloux et des mesures d'émoussé. Comparaison des mesures d'émoussé de Cailleux et de Krumbein

Determination of confidence limits characterizing gravel petrographic counts and roundness values. Comparison of roundness values by the Cailleux and the Krumbein methods

Albert PISSART*, Frédérique DUCHESNE* et Christian VANBRABANT*

Résumé

Pour interpréter correctement les résultats de comptages de cailloux de différentes natures, il convient d'en calculer la signification statistique. Celle-ci permet de connaître, en fonction du nombre de cailloux considérés, l'intervalle dans lequel se trouve, avec une probabilité définie (par exemple 95 %), la valeur réelle. Il est aisé de déterminer le nombre de cailloux à considérer pour obtenir une précision donnée. De la même manière, la détermination de l'intervalle de confiance que l'on peut accorder à des séries de mesures d'émoussé évite de considérer des différences non significatives. Le mode de calcul de cet intervalle peut être appliqué aux mesures de l'indice d'émoussé de Cailleux comme aux mesures de l'indice d'arrondi de Krumbein. Ces deux méthodes d'étude de l'émoussé donnent des moyennes comparables bien que la mesure d'un seul caillou puisse être très différente. La mesure de l'émoussé selon Krumbein présente cependant deux avantages : elle est beaucoup plus rapide que la mesure selon Cailleux et des expérimentateurs différents trouvent, lorsqu'ils traitent le même lot de cailloux par la méthode de Krumbein, des résultats qui sont plus proches les uns des autres. La méthode de Cailleux présente par contre l'avantage de permettre la réalisation d'histogrammes plus détaillés et peut être utilisée pour des mesures automatiques par analyseur d'images qui seraient malaisées avec la méthode de Krumbein. Le nombre d'éléments à mesurer pour obtenir une précision donnée est facile à calculer pour les deux méthodes.

Mots clés : sédimentologie, nature des cailloutis, mesures d'émoussé, intervalle de confiance.

Abstract

The results of gravel petrographic counts may be better assessed if their statistical parameters are known. If the number of pebbles counted is known, it is easy to determine the mean value with a defined probability (e.g. 95 %). In the same way, the determination of confidence limits characterizing roundness values avoids any misinterpretation of the results. This determination can be applied to values obtained by both the Cailleux and Krumbein methods. Both give similar means, although population distributions may be very different. The Krumbein method is much quicker but the Cailleux method lends itself to automated image analysis and is more appropriate for producing histograms. The number of pebbles necessary in order to obtain a defined accuracy is easy to determine for both methods.

Key words: sedimentology, counts of gravel lithologies, roundness, confidence limits.

*. Département de Géographie Physique, Université de Liège, Sart Tilman, B11, 4000 Liège, Belgique.

INTRODUCTION

En 1957, l'un de nous (A. P.) a suivi un stage de sédimentologie organisé à la Sorbonne par le Professeur André Cailleux. Ce dernier lui a fait découvrir la sédimentologie des formations détritiques. Peu après, A. Cailleux et J. Tricart (1959) ont publié trois volumes où sont consignés non seulement les notions que A. Cailleux avait enseignées, mais aussi de nombreux résultats de mesures susceptibles de constituer des éléments de comparaison. Cet enseignement de A. Cailleux a été à l'origine d'un cours de sédimentologie qui a été donné à l'Université de Liège pendant plus de 30 ans et qui a déterminé la réalisation de quelques travaux de fin d'études. Le présent article qui reprend deux d'entre eux, a été exposé au cours du colloque qui a été organisé les 16 et 17 janvier 1997 à Paris à l'occasion du dixième anniversaire du décès de A. Cailleux. Il a permis aux auteurs de rappeler ce qu'ils doivent à André Cailleux et de montrer toute l'importance des recherches de ce dernier.

La première partie du présent article porte sur la signification statistique des comptages de cailloux de différentes natures (travail de fin d'études présenté en 1982 par F. Duchesne) ; la seconde concerne la mesure de l'éroulé des galets (travail de fin d'études présenté en 1984 par Ch. Vanbrabant). Nous considérerons ces deux travaux successivement ; le premier a fait l'objet d'une publication (Duchesne et Pissart, 1985) qui semble être passée inaperçue bien qu'elle soit susceptible d'aider à interpréter correctement les comptages de cailloux ; la seconde étude qui traite de l'éroulé des cailloux n'a jamais été publiée.

LES COMPTAGES DE CAILLOUX DE NATURES PÉTROGRAPHIQUES DIFFÉRENTES

L'étude de la nature des éléments d'un cailloutis fournit souvent des indications intéressantes sur l'agent de sa mise en place. Parfois la découverte d'un seul caillou prouve l'existence d'une capture, comme par exemple la présence de cailloux de granite des Vosges que l'on retrouve dans la vallée de la Meuse et qui témoignent de la capture de la Moselle. Mais le plus souvent, c'est à la suite de comptages des éléments de natures différentes que des informations précieuses sont recueillies. A. Cailleux et J. Tricart (1959) en donnent de bons exemples en soulignant combien il est fondamental de respecter, lors des comptages, des limites dimensionnelles bien précises (par exemple : 2 à 3 cm, 4 à 6 cm ...).

Tous les travaux que nous connaissons actuellement et qui fournissent des résultats de comptages des éléments se limitent à donner les résultats des dénombrements sans fournir d'indication sur la signification statistique des résultats obtenus. Il est pourtant fort aisé de préciser pour une probabilité définie l'intervalle de confiance des comptages réalisés. Cette information qui est de règle pour la présentation par exemple des résultats de datation ^{14}C , permet d'éviter la formulation de conclusions abusives basées sur l'interprétation de différences non significatives. Pour pouvoir calculer un intervalle de confiance, il est indispensable de connaître le nombre de cailloux comptés ; cette valeur doit donc toujours être donnée, de la même façon qu'il est indispensable de préciser la nature des éléments considérés, et la taille des cailloux pris en compte.

Détermination de l'intervalle de confiance des comptages

La question considérée ici est un problème purement statistique. Il peut être comparé au problème de la connaissance du pourcentage de boules blanches et de boules noires contenues dans un sac, après en avoir, au hasard, retiré un certain nombre. Dans

quelle mesure le résultat trouvé après ce prélèvement approche-t-il le pourcentage de boules de couleurs différentes contenues dans le sac ? La question abordée ici ne concerne donc ni les erreurs de détermination, ni les erreurs qui résultent d'un prélèvement biaisé, ni les problèmes de prélèvement qui se posent si le cailloutis étudié n'est pas homogène.

La comparaison avec le problème purement statistique évoqué ci-dessus et qui considère seulement des boules blanches et noires se justifie, bien qu'un cailloutis présente habituellement plus de deux natures différentes parce que l'on peut prendre en compte pour chaque nature seulement deux catégories d'éléments, à savoir d'une part la nature considérée et d'autre part, l'ensemble de toutes les autres pétrographies. Le problème est ainsi ramené à l'étude d'une distribution binomiale.

x	100 px	95 %	99 %
0	0	0,00-3,69	0,00-5,26
1	1,02	0,03-5,55	0,01-7,34
2	2,04	0,25-7,18	0,11-9,12
3	3,06	0,64-8,69	0,35-10,75
4	4,08	1,12-10,12	0,69-12,30
5	5,1	1,68-11,51	1,12-13,78
6	6,12	2,28-12,85	1,60-15,21
7	7,14	2,92-14,16	2,12-16,60
8	8,16	3,59-15,45	2,69-17,95
9	9,18	4,29-16,72	3,28-19,28
10	10,2	5,00-17,97	3,90-20,58
11	11,22	5,74-19,20	4,54-21,87
12	12,24	6,49-20,41	5,21-23,13
13	13,27	7,26-21,62	5,89-24,38
14	14,29	8,04-22,81	6,59-25,61
15	15,31	8,83-23,99	7,31-26,82
16	16,33	9,63-25,16	8,04-28,03
17	17,35	10,44-26,3	8,78-29,22
18	18,37	11,26-27,5	9,53-30,40

Tableau 1 – Exemple d'une partie de table donnant les limites de confiance exactes dans une distribution binomiale. Cas d'un comptage de 98 cailloux. x = nombre de cailloux d'une nature donnée qui a été compté dans le lot de 98 cailloux considérés ; 100 px = pourcentage auquel ce nombre de cailloux correspond ; 95 % = limites de l'intervalle de confiance à 95 % ; 99 % = limites de l'intervalle de confiance à 99 %. Des tableaux équivalents pour des valeurs différentes de x peuvent être trouvées dans des livres de statistiques ou des tables scientifiques (exemple: Geigi, 1963).

Table 1 – Part of a table giving the confidence limit of the binomial distribution for a sample of 98 pebbles. x = number of pebbles of a given type contained within the total sample of 98 pebbles. 100 px = percentage of sample represented by these pebbles. 95 % = 95 % confidence limits. 99 % = 99 % confidence limits. Equivalent tables for different values of x can be obtained in statistics books or scientific tables (e.g. Geigi, 1963).

Des tables sont publiées qui fournissent directement une réponse à la question posée. Nous en donnons un exemple (tab. 1) tiré des tables scientifiques de Geigy (1963) pour un comptage de 98 cailloux (N = 98). La première colonne donne le nombre (x) de cailloux d'une nature déterminée obtenu dans le comptage. La deuxième colonne donne le pourcentage auquel ce nombre correspond. La troisième colonne donne les limites de confiance à 95 % que l'on peut accorder à ce résultat. Ainsi, si 15 cailloux de quartz ont été dénombrés (1^{re} colonne), le pourcentage d'éléments de quartz qui y correspond est de 15,31 % (2^{me} colonne), ce qui correspond à un intervalle de confiance à 95 %, compris entre 8,83 % au minimum et de 23,99 % au maximum (3^{me} colonne). Pour un intervalle de confiance à 99 % les valeurs sont comprises entre 7,31 et 26,82 % (4^{me} colonne). Cela signifie que la vraie valeur, c'est-à-dire celle qui correspond au pourcentage d'éléments de quartz que comprend le dépôt, a 95 % de chances de se trouver entre $\pm 8\%$ et $\pm 24\%$. Cet exemple montre qu'en comptant seulement une centaine de cailloux, on ne peut qu'approcher la valeur réelle du contenu d'une nature déterminée d'un cailloutis !

Ces tables sont établies par la formule ci-dessous qui, dans un échantillon homogène, permet de déterminer la valeur de l'écart-type σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (1)$$

Dans cette formule, p est le pourcentage réel d'éléments existant dans le cailloutis étudié, et n le nombre de cailloux considérés. Comme la valeur p est inconnue, on la remplace par P qui est le pourcentage obtenu dans un comptage et σ est estimé par s :

$$s = \sqrt{\frac{P(1-P)}{n}}$$

Il est connu que 68 % des données sont comprises dans deux écarts-types, c'est-à-dire que l'estimation tombera entre $(p + s)$ et $(p - s)$ dans environ 68 % des cas, entre $(p + 2s)$ et $(p - 2s)$ dans environ 95 % des cas, entre $(p + 3s)$ et $(p - 3s)$ dans environ 99,7 % des cas.

Il est impossible de donner ici toutes les tables précisant les limites de confiance exactes dont nous venons de parler. On peut cependant s'affranchir de la consultation de ces tables et obtenir des valeurs approchées en utilisant un graphique qui a été proposé

par L. Van der Plas et A. C. Tobi (1965) pour déterminer l'intervalle de confiance dans des comptages minéralogiques. Ce graphique est présenté sur la figure 1. Il donne

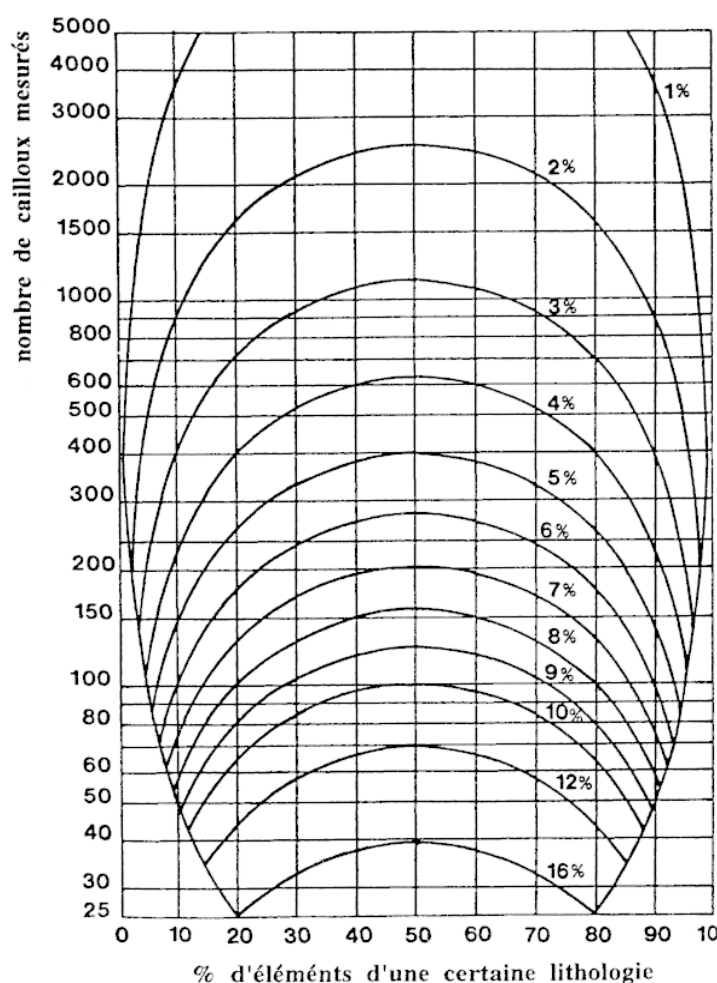


Fig. 1 – Graphique proposé par Van der Plas et Tobi (1965) pouvant servir à déterminer, en fonction du nombre de cailloux considérés, l'intervalle dans lequel se trouve avec une probabilité de 95 % la valeur réelle de l'indice d'émoussé. Exemple d'utilisation pour un comptage n de 150 cailloux : si 60 cailloux d'une nature déterminée (soit 40 %) sont trouvés, le graphique montre que le pourcentage réel se trouve avec une probabilité de 95 %, dans un intervalle de 8 %, c'est à dire entre 32 et 48 %.

Fig. 1 – The graph proposed by Van der Plas and Tobi (1965) can be used to determine, as a function of the number of pebbles under consideration, the interval within which, with a 95 % probability, the real value of roundness can be obtained. For example, using a count of 150 pebbles: if 60 pebbles (i.e. 40 %) of one category are found, the graph indicates that the percentage that actually exists, with a 95 % probability, lies within an 8 % class interval (i.e. between 32 and 48 %).

l'intervalle dans lequel se trouve, avec une probabilité de 95%, la valeur réelle, c'est-à-dire les valeurs calculées pour $(p + 2 s)$ et pour $(p - 2 s)$.

Sur ce graphique, les valeurs recherchées ne peuvent cependant être toutes trouvées. En effet une zone sans indication existe pour des comptages inférieurs à 400 éléments, c'est-à-dire aux parties inférieures droite et gauche du graphique. Dans cette zone, les résultats des calculs donnent des valeurs très asymétriques. Par exemple, pour un comptage de 100 cailloux où l'on a trouvé 2 cailloux d'une nature déterminée, le pourcentage réel de cette nature est compris entre 0,24 et 7,04 % (de même l'absence totale de cailloux dans un comptage de 100 cailloux signifie qu'à 95 % de chances, le pourcentage réel est compris entre 0 et 3,62 %).

Exemple d'application

A titre d'exemple d'application de ce calcul d'intervalle de confiance, nous donnons ci-dessous les résultats de l'étude de la nature des cailloux de 4 à 6 cm dans les alluvions actuelles de l'Ourthe, affluent de la Meuse à Liège. La localisation des prélèvements est indiquée sur la figure 2 et les résultats des comptages dans

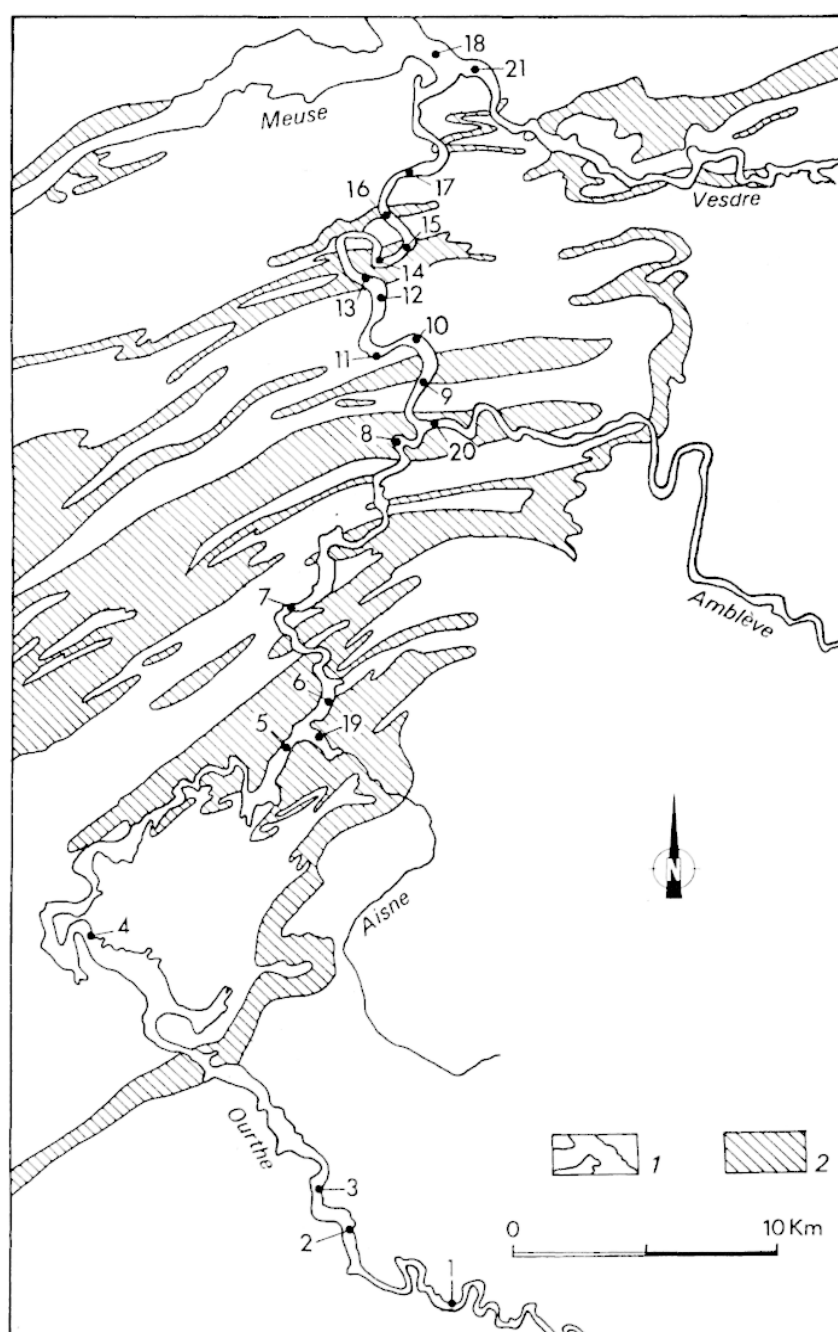


Fig. 2 – Localisations des lieux de prélèvements des échantillons de cailloux de 4 à 6 cm dans le lit actuel de l'Ourthe et de ses affluents. 1 : limites de la plaine alluviale ; 2 : localisation des principales roches calcaires.

Fig. 2 – Location of the sampling point of pebbles, 4-6 cm in diameter, in the bed of the Ourthe River and its tributaries. 1: border of the alluvial plain; 2: location of main calcareous rocks.

le tableau 2. La figure 3 (A) montre la variation de pourcentage des cailloux de quartz. Les intervalles de confiance à 95 % des différents comptages ont été figurés. Il est clair que les barres qui représentent les intervalles de confiance des différentes mesures se recouvrent en général et qu'il est vain, en conséquence, de vouloir tirer des conclusions de la majorité des variations observées. Sur cette figure, seul le prélèvement 7 est significativement différent à 95 % du prélèvement 9. L'intervalle de confiance est pour ce prélèvement particulièrement étroit parce qu'en cet endroit, 2098 cailloux ont été comptés; ailleurs, sauf en 13 où 2074 cailloux ont aussi été comptés, le nombre de cailloux considérés variait entre 200 et 500.

La figure 3 (B) montre la variation du pourcentage de cailloux calcaires dans le même tronçon de l'Ourthe. Ici les variations de pourcentages sont plus souvent

n° de prélèvement	Position le long de l'Ourthe, d'amont en aval	quartz	veine de quartz > 5cm	veine de quartz < 5 cm	veine de quartz < 2 cm	calcaire	C. avec cubes pyrites	chert	silex	poudingue	arkose	éléments anthropiques	divers	nombre de c. comptés
1	Laroche	4,2	1,4	-	1,9	-	3,7	-	-	-	-	-	88,8	215
2	Jupille	6,9	0,9	1,9	4,6	-	2,3	-	-	-	-	-	83,4	216
3	Marcourt	6	1	1	3	0,4	19	-	-	-	-	-	69,6	219
4	Deulin	5	3	3	2	0,6	9	-	-	-	-	0,3	77,1	326
5	Bomal 1	6	2	2	9	0,4	9	-	-	0,3	-	-	71,3	462
Confluence avec l'Aisne d'où vient le prélèvement 19.														
6	Bomal 2	6	2	4	8	1	5	-	-	-	-	-	74	371
7	Hamoir	2,4	-	4,4	4,4	12,7	1,5	-	-	-	-	0,5	74,1	205
8	Comblain	5,5	1,5	5,7	4,2	6,5	3,4	0,6	-	-	0,2	0,4	72	524
Confluence avec l'Amblève d'où vient le prélèvement 20.														
9	Chanxhe	7,72	5,24	10,1	8,91	8,2	6,58	0,92	0,05	0,2	-	1,11	50,9	2098
10	Pouleur	7,9	5,1	9,5	8,9	7	5,1	0,9	-	-	-	1,3	54,3	316
11	Souverain-Pré	7,5	2,8	7,5	5,6	2,3	2,5	0,9	-	-	-	0,9	70	214
12	Ile de la Venne	6,8	3,7	11	6,3	-	4,7	-	-	1,6	-	-	65,9	191
13	Esneux	5,79	5,5	7,43	8,15	1,83	3,81	0,72	0,05	0,29	0,4	0,9	65,1	2074
14	Hony	7,1	12,2	3,8	6,6	3,5	2,5	-	-	1-	0,2	0,5	63,6	393
15	Méry	3,9	12,6	4,9	4,4	0,5	1,5	-	-	-	0,5	1	69,7	203
16	Ste-Anne	3,4	12,3	4,2	6,4	1,7	2,5	-	1,3	-	0,9	2,5	64,8	236
17	Tilff	5	3	8	9,5	0,5	2	-	1	0,5	-	2,5	68	195
Confluence avec la Vesdre d'où vient le prélèvement 21														
18	Angleur	11	9	7	12	-	4	-	1	-	1	-	55	204
Affluents avant leur confluence avec l'Ourthe														
19	Aisne	4,1	3,6	4,1	2,1	19,5	-	-	-	2,6	-	2,1	61,9	195
20	Amblève	7,3	4,5	8,5	12,8	3,9	6,8	0,4	-	-	0,6	0,8	54,3	533
21	Vesdre	1	6,4	6,9	14,4	1,5	1,5	-	10,4	-	-	4,5	53,4	202

Tableau 2 – Résultats exprimés en % des comptages pétrographiques d'échantillons prélevés dans les alluvions actuelles de l'Ourthe (localisation des prélèvements : fig. 2). Les tirets placés dans le tableau indiquent qu'aucun élément de cette catégorie n'a été observé dans les prélèvements.

Table 2 – Results, expressed as a % of the petrographic counts of samples from the recent alluvium of the Ourthe River (for location of samples, see fig. 2). The dashes placed in the table indicate that no element of this category has been observed in the samples.

significatives. L'explication est que dans cette rivière, les cailloux de calcaire disparaissent par dissolution après un déplacement d'environ 5 km. La comparaison entre la vitesse de dissolution des calcaires et la dissolution de pierres calcaires appartenant à des barrages localisés dans le même secteur de la rivière a permis d'estimer que ces cailloux calcaires parcourent moins de 5 km en 9 siècles (F. Duchesne et A. Pissart, 1985).

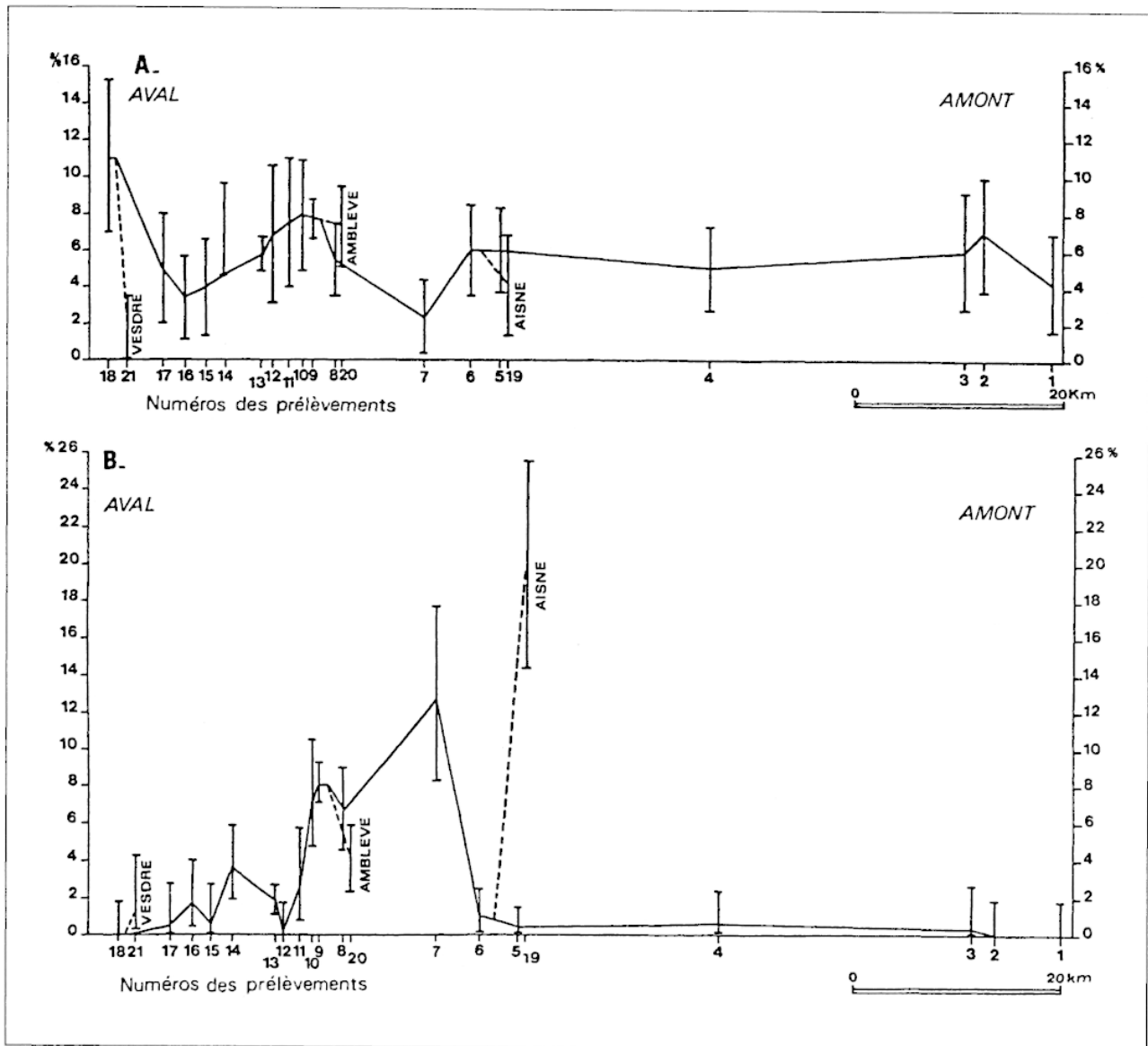


Fig. 3 – Variation du pourcentage de cailloux de quartz (A, en haut) et de cailloux de calcaire (B, en bas) dans la fraction 4 à 6 cm des alluvions actuelles de l'Ourthe inférieure. Les droites verticales données en chaque point de prélèvement correspondent à la zone où se trouve avec une probabilité de 95 % la vraie valeur. Les numéros de prélèvements sont ceux indiqués dans le tableau 2 et sur la carte donnée à la figure 2.

Fig. 3 – Variation in the percentage of quartz pebbles (A, above) and of limestone pebbles (B, below) in the 4-6 cm fraction of the present day alluvium of the Ourthe River. The right vertical line at each sampling point corresponds to the zone where one finds the true value with a 95% probability. The sampling numbers are indicated on table 2 and on the map given in figure 2.

LES MESURES D'ÉMOUSSÉ DES CAILLOUX

Pendant de nombreuses années, à l'Université de Liège, les étudiants ont appris seulement la méthode d'étude de l'émoissé des cailloux qui a été proposée par A. Cailleux en 1947. Celui-ci avait considéré comme indice d'émoissé de premier ordre, le rapport entre le plus petit rayon de courbure r_1 (trouvé dans le plan défini par la plus grande longueur mesurable et la plus grande largeur perpendiculaire au grand axe) et la plus grande longueur mesurable L , le tout multiplié par 2000, soit :

$$\frac{r_1 \cdot 2000}{L} \quad (2)$$

Le plus petit rayon de courbure, exprimé par le chiffre 1 mis en indice (r_1), donne l'indice d'émoissé de premier ordre ; le rayon de courbure directement plus grand (r_2) permet de calculer l'indice d'émoissé de second ordre. Cette mesure de l'émoissé qui s'est imposée dans les pays francophones, n'est pas la seule qui ait été proposée. Déjà en 1932, H. Wadell a défini l'indice d'émoissé qui porte son nom, indice reconnu comme le plus précis de tous mais qui a été rarement utilisé car il nécessite un temps très long de mesure. Pour chaque caillou, il s'agit de mesurer dans trois plans orthogonaux les rayons de courbure de tous les angles, c'est-à-dire de toutes les parties du contour dont le rayon de courbure est égal ou moindre que le rayon du plus grand cercle inscrit. Pour chaque plan, l'émoissé sera égal à la somme des rapports des rayons des angles sur le rayon du plus grand cercle inscrit dans le plan ; cette somme est divisée par le nombre d'angles pris en compte pour le plan étudié. Enfin, on calcule la moyenne des trois émoissés ainsi obtenus. Autrement dit, si

r = le rayon d'un angle,

R = le rayon du plus grand cercle inscrit dans le plan,

N = le nombre d'angles pris en compte,

$$\text{alors l'émoissé dans un plan} = \frac{1}{N} \sum \frac{r}{R} \quad (3)$$

et l'indice d'émoissé de H. Wadell (1933) est égal à la moyenne d'émoissé des trois plans.

Afin de raccourcir le temps nécessaire aux mesures, W. Krumbein en 1941 créa un nouvel indice d'émoissé : l'indice d'arrondi qui porte son nom. Celui-ci utilise une échelle visuelle présentant différentes images de galets mesurés par la méthode de H. Wadell. La mesure d'arrondi de W. Krumbein résulte donc d'une simple comparaison du galet avec des images standard de galets d'émoissés connus. La valeur d'émoissé de l'image la plus ressemblante lui est attribuée. Certaines précautions doivent être prises lors des mesures : il faut tenir le caillou entre le pouce et l'index afin de définir le plan le plus large possible, ceci afin de rester en accord avec la méthode de H. Wadell (1933), il faut bien observer le contour, non seulement il faut prendre en compte la forme générale, mais aussi les irrégularités du contour ; enfin pour les cailloux cassés, on détermine la valeur de la partie non cassée, valeur que l'on divise par deux.

La valeur finale de l'émoissé de la formation est représentée par la moyenne des valeurs obtenues pour tous les cailloux.

Il existe d'autres mesures d'émoissé comme celle de M. Powers (1953) qui est obtenue également par comparaison avec des échelles visuelles. Par ailleurs, il faut mentionner aussi l'indice de C. Wentworth (1919) :

$$I_w = \frac{r_1}{\frac{L_s + l_s}{4}} \quad (4)$$

Dans cette formule, r_1 est le plus petit rayon de courbure,
 L_s est la plus grande longueur,
 l_s est la plus grande largeur.

En 1964, A. Cailleux a montré que l'indice de C. Wentworth (1919) et l'indice d'émoissé qu'il a préconisé en 1947 étaient en fait très voisins. L'indice de W. Kuenen (1955) est également fort proche. Il considère au dénominateur la plus grande largeur du caillou à la place de la plus grande longueur.

La précision des mesures et la facilité de les réaliser

Il paraît à première vue évident que les mesures de la longueur et du plus petit rayon de courbure, qu'implique la méthode préconisée par A. Cailleux en 1947, sont précises et, en tous cas, meilleures qu'une estimation de ressemblance entre un caillou considéré et une forme donnée sur une figure, comme procède la méthode de Krumbein. Toutefois, les mesures de différents lots de cailloux qui ont été répétées par des étudiants pendant plusieurs années à l'Université de Liège, nous ont conduit à modifier ce point de vue. Certes les mesures de la plus grande longueur des cailloux donnent des résultats très voisins quelle que soit la personne qui manipule les cailloux ; il n'en va toutefois pas de même pour la mesure du plus petit rayon de courbure. Lors de premiers essais, nous avons cru que cette différence résultait, soit d'une inattention des étudiants, soit d'une information incomplète sur la méthode de mesure elle-même. La multiplication des essais pendant plusieurs années avec non seulement des lots de cailloux différents, mais aussi avec des groupes d'étudiants divers, nous a montré que parfois il n'était pas possible que différents expérimentateurs arrivent aux mêmes résultats comme Ph. Kuenen (1955) et R. L. Folk l'avaient déjà constaté pour des mesures identiques. Comme la dispersion des résultats (écart-type des mesures) était équivalente pour plusieurs expérimentateurs alors que les résultats étaient significativement différents, nous avons admis que la responsabilité de cette différence incombe aux différentes manières qu'ont les chercheurs de suivre les critères définis pour les mesures. La faute ne peut, à notre avis être mise au compte des expérimentateurs; il faut la rechercher dans l'impossibilité pratique de respecter strictement la définition de l'indice sans interprétation personnelle.

Lors de séances de travaux pratiques dirigées par E. Juvigné, le plus petit rayon de courbure a été mesuré sur des cailloux de quartz de 4 à 6 cm en définissant strictement l'arc à considérer. La dispersion des résultats des mesures se réduit lorsque l'arc considéré s'agrandit. L'écart maximum moyen obtenu pour cinq expérimentateurs sur 30 cailloux de quartz (20 cailloux à émoissé fluvial, et 10 cailloux à émoissé marin) a été réduit de 1/3 lorsque l'arc de mesure passe de 30 à 70°. Au delà de 70°, la mesure

n'est plus possible pour un certain nombre d'éléments, car aucun rayon de courbure ne s'étend sur un arc aussi grand. Il s'est donc révélé impossible de rapprocher d'une manière satisfaisante les résultats des différents expérimentateurs.

Ces essais nous ont incité à effectuer sur les mêmes lots de cailloux des mesures de l'indice d'arrondi par la méthode de W. Krumbein. Celle-ci est infiniment plus rapide puisque la valeur d'émoussé est obtenue, comme nous l'avons précisé plus haut, en comparant les cailloux avec une figure montrant des éléments présentant dix valeurs d'émoussé différentes. Outre cet avantage important d'obtenir la valeur d'émoussé au moins 5 fois plus rapidement, nous avons constaté que les valeurs obtenues par différents expérimentateurs se rapprochent beaucoup plus les unes des autres que celles que les mêmes personnes trouvaient par la mesure de A. Cailleux. Cependant, comme nous le montrerons plus loin, les moyennes des résultats obtenus avec les deux méthodes sont quasi identiques. En conclusion, nous préconisons l'utilisation de la méthode de W. Krumbein pour obtenir des moyennes car elle est beaucoup plus rapide et donne des valeurs qui peuvent être plus facilement retrouvées par différentes personnes.

Il convient cependant d'ajouter qu'un histogramme réalisé avec des résultats obtenus par la méthode de A. Cailleux peut être beaucoup plus détaillé qu'un histogramme construit avec la méthode de W. Krumbein qui ne distingue que 10 classes différentes et donc qu'à ce point de vue, la méthode de A. Cailleux est incontestablement la meilleure des deux. Enfin, remarquons que, compte tenu du progrès des outils informatiques et de traitements des données, l'automatisation des mesures d'émoussé de Cailleux devient possible. Il n'en va pas de même pour la mesure d'arrondi de W. Krumbein qui prend en compte non seulement l'arrondi des angles mais aussi les irrégularités de forme du contour.

Le paramètre à utiliser pour représenter une série de mesures

En 1959, A. Cailleux et J. Tricart ont proposé d'utiliser la *médiane* comme paramètre représentatif d'une série de mesures. Cette proposition trouvait alors sa justification dans le fait qu'on ne disposait pas de machines à calculer et qu'une moyenne des résultats était longue à obtenir (en 1958, Cailleux écrivait : "... j'ai contribué à généraliser l'emploi des médianes... plus vite établies que les moyennes arithmétiques."). Toutefois, il est démontré par les statisticiens (Dagnelie, 1973), que "il faut prendre un échantillon de 157 individus pour obtenir par la *médiane* une estimation aussi fiable que celle calculée grâce à la *moyenne* avec un échantillon de seulement 100 individus". En conséquence, il est clair qu'il est préférable de calculer les moyennes au lieu de considérer simplement les médianes. Précisons que la médiane ne dépend pas des valeurs extrêmes qui sont parfois très anormales, tandis que la moyenne par contre subit l'influence de ces valeurs.

Le nombre de cailloux à mesurer et la signification statistique des résultats

Dans l'article de A. Cailleux de 1947, donnant la définition de l'indice d'émoussé portant son nom, l'auteur donne une série de mesures d'émoussé prises sur des sédiments provenant de diverses formations. Vingt-trois séries de mesures sont ainsi présentées. En moyenne, A. Cailleux mesura 73 galets par série. Cependant certaines séries comprenaient moins de 50 galets, d'autres plus de 150. En fait le nombre de

galets à mesurer ne semblait pas être déterminé. En 1941, W. Krumbein conseillait de mesurer si possible 50 galets, voire au minimum 25. En 1959, A. Cailleux et J. Tricart proposaient de considérer des séries de 20 à 40 cailloux avant de calculer une médiane. L'utilisation préconisée d'histogrammes d'émoissé a rendu nécessaire par la suite de prélever un plus grand nombre de cailloux. J. Tricart et R. Schaeffer en 1950 ont compté entre 100 et 150 cailloux. Ils écrivent en présentant leurs résultats que ces nombres ne sont pas très élevés et que "les courbes ne sont pas d'une extrême précision. Certains détails sont fortuits et disparaîtraient si le lot mesuré était plus important ; néanmoins, l'allure générale échappe à la critique...".

Ces nombres sont-ils suffisants ? Il est évident que pour des raisons d'efficacité de la recherche, les mesures ne peuvent être multipliées à l'infini. Une approche purement expérimentale de ce problème a été publiée en 1965 par N. Mihailescu. La figure 4 montre le résultat final de ses essais et démontre, ce qui est évident, que plus on multiplie les mesures, plus on se rapproche de la valeur recherchée. Les conclusions tirées de ses diverses expériences ont été exprimées par N. Mihailescu comme suit : "... nous sommes d'avis que, pour que les valeurs obtenues par l'analyse statistique soient les plus rapprochées possibles des valeurs réelles, il est nécessaire de mesurer 120 galets pour la classe dimensionnelle 40-60 mm et 150 galets pour la classe dimensionnelle 30-35 mm."

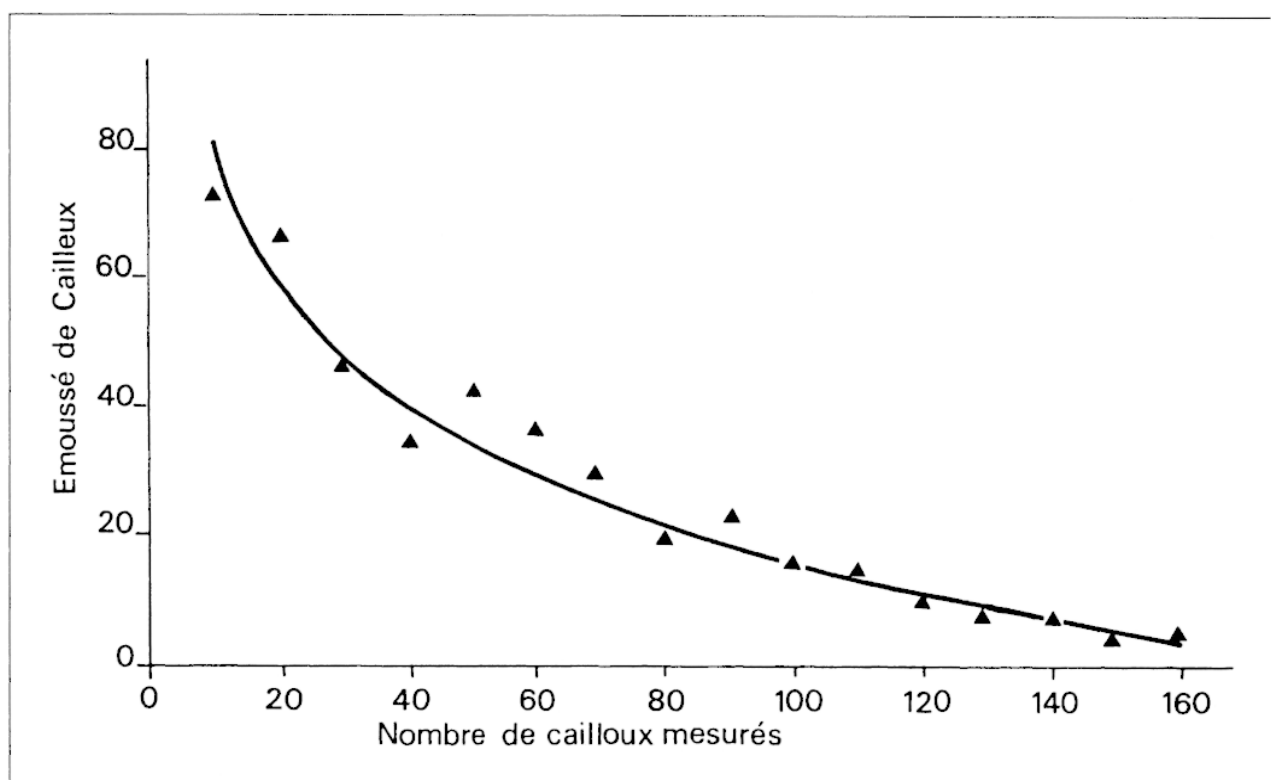


Fig. 4 – Courbe expérimentale des erreurs possibles affectant les moyennes d'émoissé en fonction du nombre de mesures exécutées (n, en abscisse). Les erreurs (en ordonnée) sont exprimées en valeur d'émoissé de Cailleux. Classe dimensionnelle 4 à 6 cm. Extrait de Mihailescu, 1965, p. 37.

Fig. 4 – *Experimental curve of possible errors which affect the average roundness as a function of the number of measurements (n, on abscissa). The errors (on ordinate) are expressed as roundness values (Cailleux). Class dimensions are 4-6 cm. From Mihailescu, 1965, p. 37.*

Le travail que nous venons de citer ne résout pas définitivement la question de la fiabilité des mesures mais il donne une première idée de la grandeur de l'intervalle d'erreur possible qui accompagne une moyenne d'émoussé obtenue à la suite de n mesures.

Une solution statistique peut être apportée à ces questions, solution qui peut être appliquée aussi bien aux résultats obtenus par la méthode de A. Cailleux qu'à ceux obtenus par la méthode de W. Krumbein. Il est possible, à la fois de définir l'erreur relative maximum qui peut affecter une valeur d'émoussé pour un degré de confiance déterminé, et aussi de calculer le nombre de cailloux à mesurer en fonction de l'intervalle de confiance recherché. Nous le montrons ci-dessous.

Précision des mesures

La formule de l'intervalle de confiance que l'on peut attribuer à une moyenne de mesures du type de celle que nous considérons, est la suivante (Dagnelie, 1973, p. 14) :

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

où t = la variable de Student,
 \bar{x} = la moyenne des mesures,
 s = l'écart-type des mesures,
 n = le nombre de mesures.

Le tableau 3 donne les valeurs de la variable de Student pour un nombre de cailloux allant de 15 à l'infini et pour une probabilité choisie, 90%, 95% ou 99% (La variable de Student est utilisée plutôt que la variable normale réduite du fait que l'erreur standard n'est pas connue : l'intervalle en devient un peu plus large, mais la différence s'estompe rapidement pour les grands échantillons).

En guise d'application, précisons que pour une série de 120 mesures ayant donné une moyenne d'émoussé $\bar{x} = 152$ et un écart-type $s = 80$, les intervalles de confiance sont

$$\text{à } 95\% : 152 \pm \frac{1,98.80}{\sqrt{120}} = 152 \pm 14 \quad \text{et à } 99\% : 152 \pm \frac{2,62.80}{\sqrt{120}} = 152 \pm 19$$

Détermination du nombre de cailloux à mesurer pour obtenir un intervalle de confiance recherché

Il est impossible de calculer le nombre de cailloux à considérer pour obtenir un résultat avec un degré de confiance déterminé et une marge d'erreur relative choisie sans connaître le coefficient de variation du matériau étudié, c'est-à-dire sans mesurer au préalable un lot de cailloux pour déterminer ce coefficient de variation. Le coefficient de variation est représenté par l'écart-type divisé par la moyenne, soit :

$$\frac{s}{\bar{x}} .$$

La formule qui permet de connaître le nombre de cailloux à mesurer est la suivante :

$$n = \frac{t^2 \cdot V^2}{d^2} \quad (6)$$

dans laquelle n représente le nombre de cailloux à mesurer,
 t la variable de Student donnée au tableau 3,
 V le coefficient de variation exprimé en % de la moyenne et
 d l'erreur que l'on accepte sur la mesure, exprimée en % de la moyenne.

Dans l'exemple considéré plus haut, si l'on veut connaître avec un degré de confiance de 95 %, le nombre de cailloux qu'il faut considérer pour avoir un résultat avec une précision de 4 % de la moyenne (soit à ± 6 de valeur d'émousé), il convient de faire le calcul suivant :

Le coefficient de variation est de $\frac{80}{152} = 0,53$ soit 53 %.

En conséquence le nombre recherché est :

$$n = \frac{1.984^2 \cdot 53^2}{4^2} = 691$$

n	90 %	95 %	99 %
15	1,75	2,13	2,95
20	1,72	1,09	2,85
25	1,71	2,06	2,8
30	1,7	2,04	2,75
40	1,68	2,02	2,7
60	1,67	2	2,66
120	1,66	1,98	2,62
∞	1,64	1,96	2,58

Tableau 3 – Table donnant les quantiles de la distribution de t de Student à k degrés de liberté (k allant de 15 à l'infini). n : nombre de cailloux mesurés ; 90 %, 95 % et 99 % : valeur de l'intervalle de confiance se rapportant à chaque colonne (Dixon and Massey, 1985).

Table 3 – Table giving values of the student ' t ' distribution with k degree of freedom (k going from 15 to infinity). n = number of pebbles measured. 90 %, 95 %, and 99 % = values of the confidence limits reported in each column (Dixon and Massey, 1985).

Avec une précision recherchée de 10 % de la valeur de la moyenne (soit ici ± 15 de valeur d'é moussé), le nombre recherché est :

$$n = \frac{1.984^2 \cdot 53^2}{10^2} = 110$$

Cet exemple montre que le nombre de cailloux à mesurer s'élève rapidement plus la précision recherchée est grande et pourquoi il est souvent impossible d'obtenir une limite de confiance très étroite.

Remarquons que les valeurs de t de Student pour un nombre de cailloux mesurés moins 1 allant de 30 à l'infini, varient pour un intervalle de confiance de 95 %, entre 2,042 et 1,960 soit d'une manière peu importante. Dans ces conditions, la formule (6) peut être simplifiée en

$$n = \frac{4V^2}{d^2}$$

Pour un intervalle de confiance de 99 %, la même formule devient : $n = \frac{7V^2}{d^2}$

Comparaison des résultats obtenus par les mesures de Cailleux et de Krumbein pour les cailloux de quartz de 4 à 6 cm des alluvions actuelles de la Lesse

La Lesse et son affluent la Lhomme sont des cours d'eau prenant leur source dans l'Ardenne belge à environ quarante kilomètres au sud-est de Givet. Ces deux cours d'eau se réunissent à l'aval de Han-sur-Lesse et la Lesse se jette dans la Meuse près de Dinant après un parcours de près de 80 km. Onze lots de 200 à 282 cailloux de quartz de 4 à 6 cm ont été prélevés dans le lit actuel de la rivière (fig. 5). Le tableau 4 donne pour chaque prélèvement, le nombre de cailloux, la moyenne, l'écart-type et la médiane des mesures d'é moussé selon Cailleux et des mesures d'arrondi de Krumbein. La figure 6 compare les moyennes obtenues par les deux méthodes.

Ech. n°	N	Selon Cailleux			Selon Krumbein		
		Moyenne	Ecart-type	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Médiane
1	247	214	70	212	4,1	1,1	4
2	246	241	72	231	4,5	1	5
3	238	218	74	208	4	0,9	4
4	250	257	75	240	4,6	0,9	5
5	282	259	79	250	4,5	0,9	5
6	265	259	78	248	4,7	1	5
7	274	274	66	268	4,9	0,9	5
8	210	260	62	250	4,8	0,9	5
9	200	242	82	225	4,5	1,1	5

Tableau 4 – Comparaison entre les résultats de mesures d'é moussé selon les méthodes de Cailleux et de Krumbein, mesures réalisées sur les mêmes cailloux de quartz de 4 à 6 cm provenant des alluvions actuelles de la Lesse (localisation des prélèvements : fig. 5). N = nombre de cailloux mesurés.

Table 4 – Comparison between the results of roundness according to the methods of W. Krumbein and A. Cailleux, the measurements being made of the same quartz pebbles of 4-6 cm dimensions coming from the recent alluvium of the Lesse River (location of samples: fig. 5). N = number of measured pebbles.

Interprétation

Les cailloux de quartz étudiés proviennent de l'Ardenne. En aval de la limite de l'Ardenne représentée sur la figure 5, le substratum (Dévonien moyen et supérieur ainsi que Carbonifère) ne comprend pas de filons de quartz de la taille des cailloux considérés.

La similitude des résultats obtenus par les mesures effectuées par les méthodes de A. Cailleux et de W. Krumbein est excellente du moins en ce qui concerne les moyennes, comme le montre le parallélisme des droites joignant les valeurs moyennes

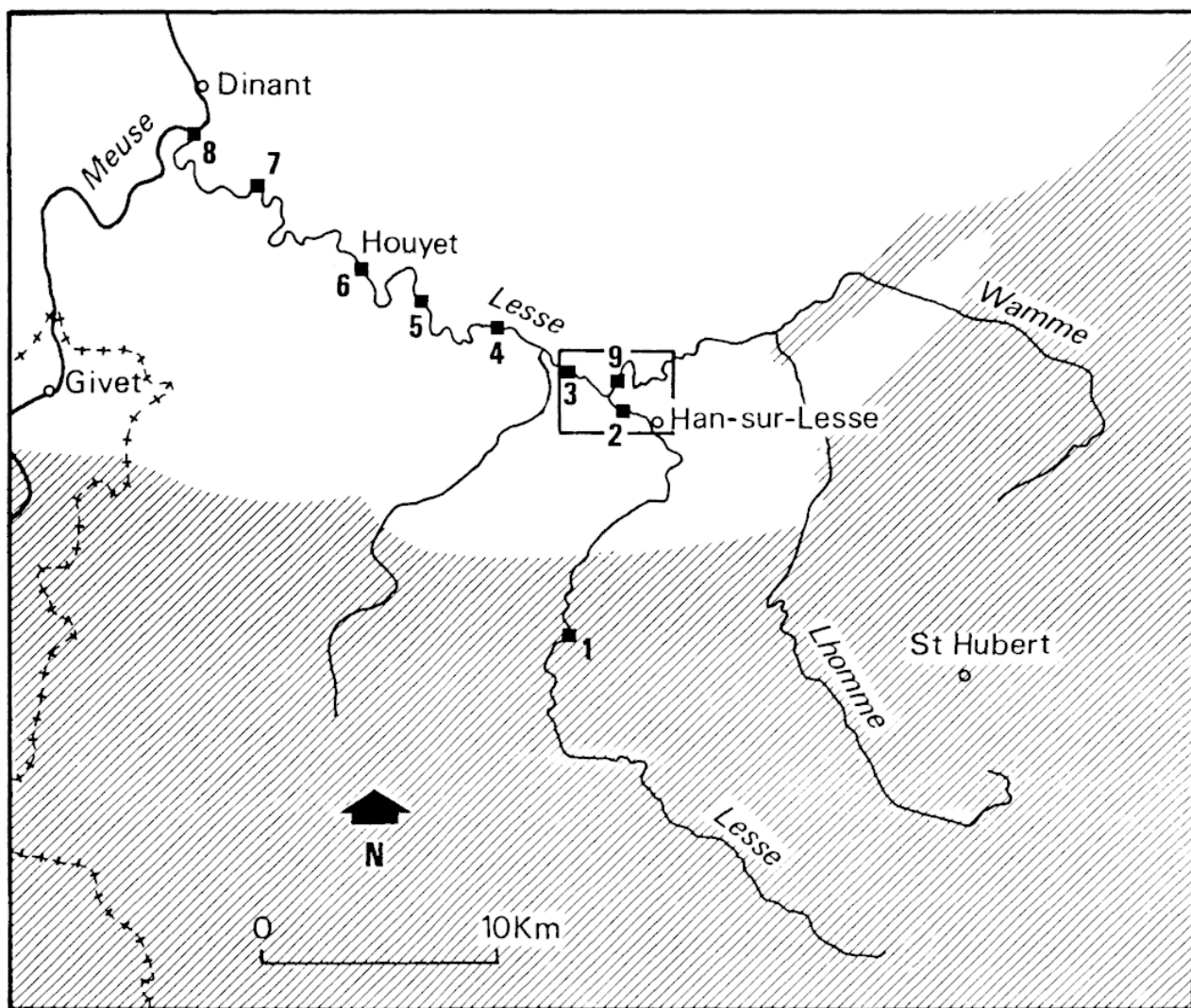


Fig. 5 – Vue générale du bassin-versant de la Lesse avec la localisation (carrés noirs) des prélèvements étudiés. Les hachurés représentent les terrains de l'Ardenne d'où peuvent venir des cailloux de quartz de 4 à 6 cm. Le rectangle à l'ouest de Han-sur-Lesse donne la zone couverte par la figure 7.

Fig. 5 – General view from the Lesse watershed with the location (black squares) of the samples analysed. Hatching represents the Ardennes from which the 4-6 cm quartz pebbles are derived. The rectangle to the west of Han-sur-Lesse outlines the region covered in figure 7.

sur la figure 6. Les deux méthodes mettent en évidence une valeur d'émoussé particulièrement faible pour le prélèvement numéro 3 (Lessive). Une légère divergence entre les résultats existe toutefois, mais, toujours, cette différence est comprise dans les intervalles de confiance de 95 % que nous avons dessinés pour tous les résultats. Les deux méthodes nous sont donc apparues comme équivalentes; toutefois si l'on se souvient que la méthode de détermination de l'émoussé préconisée par W. Krumbein est au moins 5 fois plus rapide que la méthode proposée par A. Cailleux et aussi que les résultats sont plus semblables si l'on passe d'un expérimentateur à un autre, nous sommes amenés à préconiser l'utilisation de la méthode de Krumbein pour obtenir des valeurs moyennes de l'émoussé.

Si nous revenons aux observations recueillies (fig. 6 et tab. 4), les commentaires peuvent être les mêmes si l'on considère les résultats d'après W. Krumbein et d'après A. Cailleux. Tous les deux montrent un accroissement de l'émoussé de l'amont vers l'aval, accroissement d'abord important, puis de plus en plus faible comme différents auteurs l'ont mis en évidence par des mesures sur le terrain et des expériences de laboratoire. Le dessin des intervalles de confiance montre que les variations observées entre les points 4 et 8 ne sont pas significatives et qu'il est probablement vain de vouloir rechercher pourquoi l'émoussé paraît plus élevé au point 7 qu'au point 8. Ces différences ne seraient sans doute pas confirmées si le nombre de mesures était plus grand.

Par contre, la valeur moyenne obtenue au point 3 (Lessive) est significativement différente des valeurs obtenues aux points 2 et 4 et la cause de cette différence mérite

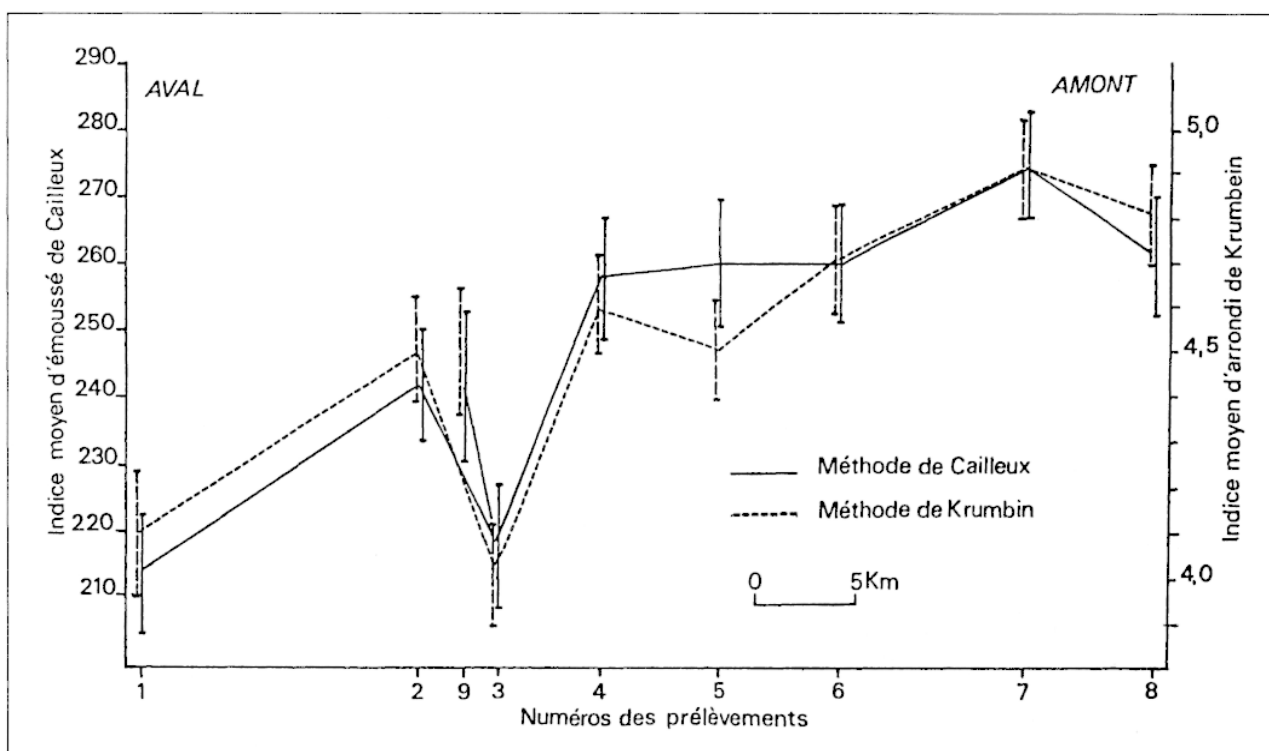


Fig. 6 – Graphique montrant la variation des mesures moyennes d'émoussé selon A. Cailleux et selon W. Krumbein dans les alluvions actuelles de la Lesse inférieure. La localisation des prélèvements est donnée figure 5.

Fig. 6 – Graph showing the variations in mean roundness values according to A. Cailleux and W. Krumbein for the present day alluvium of the lower Lesse River. The location of the sampling points is given in figure 5.

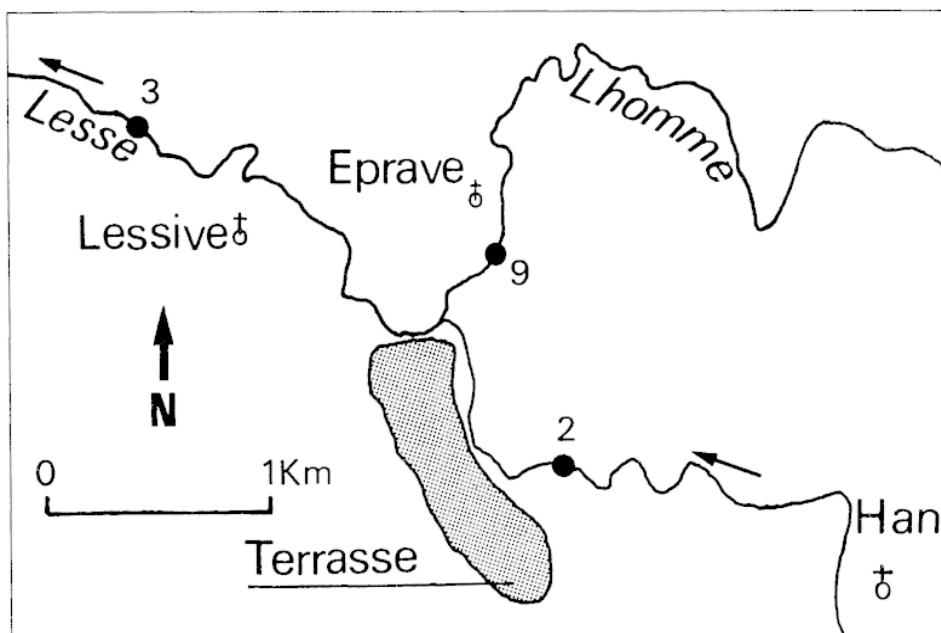


Fig. 7 – Localisation des prélèvements 2, 3 et 9 dans les lits de la Lesse et de la Lhomme.

Fig. 7 – Location of sampling points 2, 3, and 9 in the beds of the Lesse and Lhomme Rivers.

une explication. Pour tenter d'éclaircir le problème, il convient de rechercher si une source de cailloux de quartz moins émousés n'existe pas entre Han-sur-Lesse (point 2) et Lessive (point 3). A première vue les apports de la Lhomme dont la confluence se trouve entre ces deux points pourrait être la source recherchée (fig. 7). Toutefois, l'étude de l'émousé des quartz de la Lhomme (prélèvement 9, tableau 4) a donné des résultats très semblables à ceux obtenus pour les alluvions de la Lesse à Han-sur-Lesse. Ce ne peut donc être la cause de la différence observée. Celle-ci résulte très probablement du remaniement des alluvions anciennes d'une terrasse de la Lesse, sapée par l'érosion latérale de la rivière qui se trouve au sud de la confluence de la Lhomme (fig. 7). L'étude de l'émousé de 50 cailloux de quartz prélevés dans cette terrasse a montré que 36 % des éléments ont été cassés. Ce sont ces éléments anguleux qui justifient la faible valeur moyenne d'émousé trouvée dans le prélèvement 3. Ces cailloux cassés ont été émousés de nouveau au cours du transport de 2 km qui sépare cette terrasse du lieu de prélèvement de Lessive. De ce fait, à Lessive, des émousés inférieurs à 50 selon la méthode de A. Cailleux n'existent pas et les émousés inférieurs à 100 atteignent seulement 3% des éléments étudiés. Par ailleurs, si on ne divise pas par 2 la valeur d'émousé des éléments cassés comme l'impose la méthode de Krumbein, la mesure d'arrondi ne montre à Lessive aucune diminution de la valeur moyenne.

Comparaison des résultats des mesures d'émousé selon les méthodes de A. Cailleux et de W. Krumbein

Est-il possible de transformer les mesures faites selon la méthode de A. Cailleux en indice d'arrondi de W. Krumbein et inversement les mesures obtenues par la méthode de W. Krumbein en mesures d'émousé de A. Cailleux? Ce problème a déjà été abordé du moins en ce qui concerne les moyennes par T. Van Andel, A. Wiggers et G. Maarleveld (1954). En reportant sur un graphique à 2 dimensions, les moyennes trouvées par ces auteurs, la droite de régression entre les valeurs peut être exprimée : moyenne de A. Cailleux = $-219,5 + 94,43$ moyenne de Krumbein, cette relation est établie avec un coefficient de corrélation de 0,95.

A partir de nos données, une relation semblable a été trouvée qui peut être exprimée : moyenne de l'é moussé de A. Cailleux = $-169,94 + 92,14$ moyenne de Krumbein. Pour ces données, le coefficient de corrélation est de 0,98.

Par contre, si nous étudions les coefficients de corrélation entre, non plus les moyennes, mais entre les valeurs obtenues pour chaque caillou, les coefficients de corrélation pour les différents prélèvements sont relativement faibles, le plus élevé étant 0,772 pour le prélèvement 7 et le plus faible 0,506 pour le prélèvement 2. Il apparaît donc que pour un caillou, les valeurs d'é moussé obtenues par l'indice de A. Cailleux et celui de W. Krumbein ne sont pas toujours proches. Cela provient de ce que les deux indices n'étudient pas l'é moussé selon la même démarche. Pourtant les indices moyens évoluent parallèlement.

La figure 8 donne la relation entre les 2655 couples de valeurs d'é moussé obtenues par les méthodes de A. Cailleux et de W. Krumbein dans la présente étude. Cette figure montre l'extrême dispersion des valeurs. Ainsi pour un indice d'arrondi de W. Krumbein de 5, les indices d'é moussé de A. Cailleux varient de 100 à plus de 500. Cette forte variation provient du fait que l'indice de A. Cailleux s'intéresse au plus petit détail de la silhouette du galet, alors que l'indice de W. Krumbein étudie cette silhouette dans son ensemble. Un exemple permet de mieux comprendre ce fait. Imaginons une sphère fracturée en deux parties. L'indice de A. Cailleux mesure un des angles provenant de la fracturation ; l'indice de W. Krumbein donne par contre une valeur maximale qu'il faudra diviser par deux du fait de la cassure, ce qui correspondra à une valeur 4 ou 5. On peut donc comprendre que des valeurs d'é moussé d'un même caillou soient très différentes selon A. Cailleux ou W. Krumbein.

La conversion de valeurs individuelles d'é moussé obtenues par les deux méthodes n'a donc pas beaucoup de sens. Seules les moyennes peuvent être comparées.

CONCLUSIONS

Le présent article donne des méthodes simples pour calculer l'intervalle de confiance de mesures d'é moussé et de comptages de cailloux de lithologies différentes. Ces calculs d'intervalles de confiance sont extrêmement utiles pour attribuer leur vraie signification aux comparaisons entre deux résultats. Ils peuvent être appliqués aussi bien aux mesures d'é moussé obtenues par la méthode de A. Cailleux qu'aux résultats obtenus par la méthode de W. Krumbein.

La comparaison de résultats de mesures d'é moussé faites par des étudiants pendant de nombreuses années nous ont convaincu que la mesure de la moyenne d'é moussé selon W. Krumbein était plus constante quel que soit l'expérimentateur que la mesure par la méthode de A. Cailleux. Il est en effet difficile de mesurer exactement le plus petit rayon de courbure d'un caillou. La méthode de W. Krumbein étant moins exigeante en temps et les résultats moyens étant équivalents à ceux trouvés par la méthode de A. Cailleux, nous préconisons l'utilisation de cette méthode pour l'obtention de moyennes. Par contre, si on désire construire des histogrammes, la méthode de A. Cailleux qui permet la réalisation d'histogrammes plus détaillés, est incontestablement la plus intéressante. Précisons aussi qu'il est facile de comprendre ce que représente la mesure selon A. Cailleux alors que le concept de la mesure d'arrondi de W. Krumbein est moins clairement défini ; il associe non seulement les grandes courbures du caillou mais aussi le détail de la forme de celui-ci. Ceci dit, la mesure de A. Cailleux n'en demeure pas moins efficace et une masse importante de données a été accumulée au

cours des années qui peut servir à établir des comparaisons. Cette masse d'information ne peut évidemment pas être rejetée. Il convient aussi d'être conscient que selon les expérimentateurs les résultats de mesures d'émoissé selon A. Cailleux peuvent être significativement différents. Par contre pour un même expérimentateur, les résultats sont apparus comme très constants, même à plusieurs années d'intervalle.

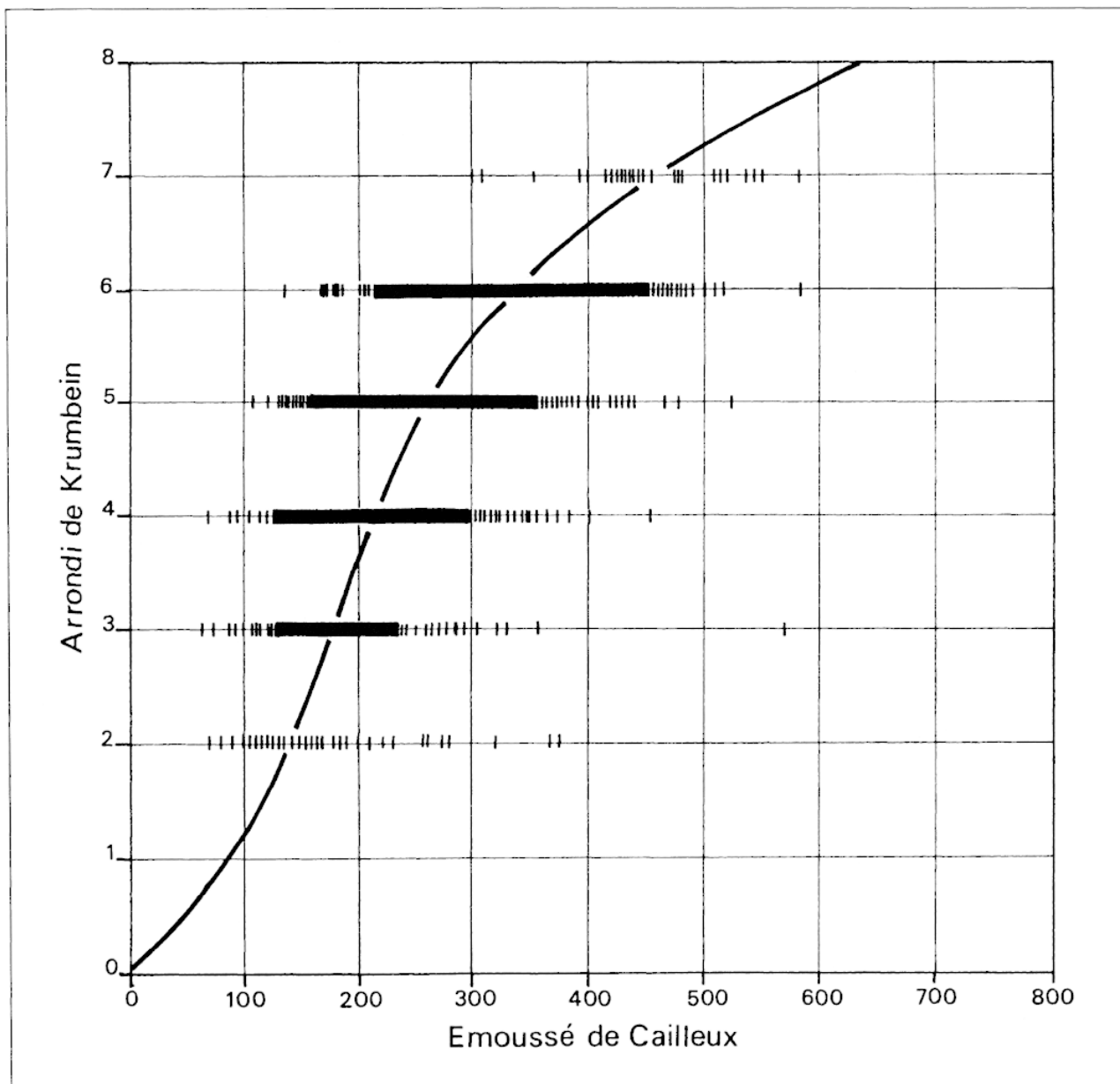


Fig. 8 – Comparaison des valeurs d'émoissé obtenues par les méthodes de Cailleux et de Krumbein pour les 2 655 quartz considérés dans la présente étude. Chaque caillou est représenté par un trait vertical dont la position sur l'axe horizontal correspond à la valeur de l'émoissé de Cailleux et la position sur l'axe vertical, à la valeur de l'arrondi de Krumbein. La courbe de régression montre la relation entre les deux séries de mesures.

Fig. 8 – Comparison of the roundness values obtained by the Cailleux and Krumbein methods for the 2 655 quartz pebbles analysed in the present study. Each pebble is represented by a vertical line, the position of which on the horizontal axis corresponds to the roundness value of Cailleux and the position on the vertical axis corresponds to the roundness value of Krumbein. A regression line shows the relationship between these two sets of measurements.

Remerciements

Monsieur E. Juvigné, professeur à l'Université de Liège, a eu l'obligeance de relire le présent article et de formuler plusieurs remarques intéressantes. Nous lui en sommes reconnaissants.

Références

- Cailleux A. (1947)** - L'indice d'émoussé : définition et première application. *Compte-rendu sommaire de la Société géologique de France*, 13-14 (10 novembre 47), 251-252.
- Cailleux A. et Cestre G. (1969)** - Indice d'émoussé du 1er au 4e ordre. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 19 (1), 15-16.
- Cailleux A. (1961)** - Application à la géographie des méthodes d'étude des sables et des galets. Universidade do Brasil, Faculdade nacional de filosofia, Centro de pesquisas de geografia do Brasil, Curso de altos estudos geograficos, 2, Rio de Janeiro, 151 p.
- Cailleux A. (1964)** - Rectification à propos de la définition de l'indice d'émoussé. *Comptes-rendus sommaires des séances de la Société Géologique de France*, 8, 318.
- Cailleux A., Tricart J. (1959)** - *Etudes des sables et des galets*. Centre de documentation universitaire, Paris, 576 p.
- Dagnelie P. (1973)** - *Théorie et méthodes statistiques*. Presses agronomiques de Gembloux, 2 tomes de 378 et 445 p.
- Dixon W. J., Massey Jr, F. J. (1985)** - *Introduction to statistical analysis*. McGraw-Hill Book Company, 4th edition, 678 p.
- Duchesne F. (1982)** - *Analyse des méthodes sédimentologiques et application aux alluvions de l'Ourthe*. Université de Liège. Travail de fin d'études en Sciences géographiques, inédit, conservé à l'Université de Liège, 204 p.
- Duchesne F., Pissart A. (1985)** - Valeur statistique des comptages de cailloux de différentes lithologies. Application aux alluvions de l'Ourthe. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 21, 13-23.
- Folk R. L. (1972)** - Experimental error in pebble roundness determination by the modified Wentworth method. *Journal of sedimentary petrology*, 42(4), 973-974.
- Geigy J. R. (edit.) (1963)** - *Tables scientifiques*. Sixième édition. Geigy S.A., Bâle, Suisse, 783 p.
- Krumbein W. C. (1941)** - Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of sedimentary petrology*, 11, 62-72.
- Kuenen Ph. H. (1955)** - Experimental abrasion of pebbles. 2. Rolling by currents. *Journal of geology*, 64, 336-368.
- Mihailescu N. (1965)** - Diagrammes concernant le nombre de mesures nécessaires aux études morphométriques. *Revue roumaine de Géologie, Géophysique et Géographie, série de Géologie*, 9 (1), 31-40.
- Powers M. C. (1953)** - A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23 (2), 117-119.
- Tricart J., Schaeffer R. (1950)** - L'indice d'émoussé des galets, moyen d'étude des systèmes d'érosion. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 4, 151-179.
- Van Andel T. J. H., Wiggers A. J., Maarleveld G. (1954)** - Roundness and shape of marine gravels from Urk (Netherlands), a comparison of several methods of investigation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 100-116.
- Van der Plas L., Tobi A. C. (1965)** - A chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science*, 263, 87-90.
- Vanbrabant C. (1984)** - *Mesure de l'émoussé des galets. Etude critique. Application aux alluvions de la Lesse et de la Lhomme*. Travail de fin d'études en Sciences Géographiques, inédit, conservé à l'Université de Liège, 155 p.
- Wadell H. (1932)** - Shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 40, 443-451.
- Wadell H. (1933)** - Sphericity and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 41, 325-331.
- Wentworth C. K. (1919)** - A laboratory and field study of cobble abrasion. *Journal of Geology*, 27, 507-521.

Manuscrit reçu le 25 Janvier 1997, accepté le 18 Février 1998